

Title	木材の超音波振動切削における切込過程の特徴
Author(s)	藤原, 勝敏; 杉原, 彦一; 松下, 隆志
Citation	京都大学農学部演習林報告 = BULLETIN OF THE KYOTO UNIVERSITY FORESTS (1979), 51: 257-266
Issue Date	1979-12-20
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2433/191672">http://hdl.handle.net/2433/191672</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

# 木材の超音波振動切削における切込過程の特徴

藤原 勝敏・杉原 彦一・松下 隆志

## Characteristics of Incision Process in Ultrasonic Vibratory Cutting of Wood

Katsutoshi FUJIWARA, Hikoichi SUGIHARA and Takashi MATSUSHITA

### 要 旨

木材の超音波振動切削において認められる切込促進効果を検討するために、勾配切削方法を用いて、微小切込における切込量と切削力の関係、切削力の変化過程の特徴等を明らかにした。結果は次のように要約できる。

- 1) 切刃が被削材の傾斜表面に接触すると背分力は立ち上がり始め、切込量の増大とともに増加し、切屑発生点において最大となり、以後漸減し、ある程度切込量が大きくなると負になる。一方、主分力は一般に切込量の増大とともに増加する。
- 2) 振動切削における切屑発生点の切込量  $t_p$  は無振動切削におけるそれよりも小さく、かつ振幅が大きいほど小さく、明らかに切込促進効果が認められる。また  $t_p$  はその切刃による切削距離  $L$  の増加とともに大きくなる。切屑発生点の背分力および主分力についても以上と同様の傾向が認められる。ただし、主分力は  $L$  の増加に関係なくほぼ一定の値になる。
- 3) 無振動切削において、切屑発生点の主分力は背分力に匹敵する大きさを示す。ところが、振動切削におけるこの点の主分力は背分力よりも小さく、さらに無振動切削の主分力に比較して極端に小さく、場合によっては負の値になる特徴的現象が認められる。なお、平削りの振動切削においても微小切込量領域では主分力が負になる可能性がある。木材の超音波振動切削における切込促進効果は主分力のこのような特性と密接に関係しているものと考えられる。
- 4) 勾配切削における切削面のうねり曲線から、微小切込段階における切削過程の特徴をある程度明らかにすることができる。
- 5) 平削りにおいて切屑が発生するために必要な最小限の切込量は勾配切削におけるそれとほぼ一致するものと推定される。また平削りにおける臨界切込量（背分力が 0 となる切込量）およびこの切込量における主分力は勾配切削におけるそれらとほぼ一致する。

### 1. 緒 論

切削において、切屑が発生するためにはある大きさ以上の切込量を必要とするが、この切込量の限界値は一般に微小である。木材の超音波振動切削におけるこの切込量は無振動切削（従来の切削）におけるそれよりも小さいことが実験的に明らかにされている<sup>1)</sup>。すなわち、切込促進効果（切刃が被削材に切込み易くなる効果）が存在する。

本研究では、この効果をさらに詳しく検討するために、切削中、切込量が直線的に増大する勾配切削方法を用いて、振動切刃と被削材原表面の接触、それに続く切刃の擦過そして切屑の発

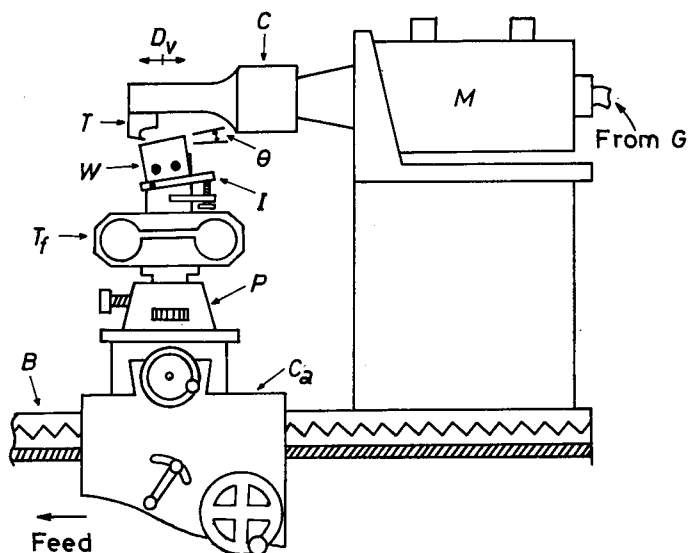


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up.

G, generator; M, nickel magnetostrictive transducer; C, concentrator; T, tool; W, work material; I, inclination plate;  $T_f$ , tool force dynamometer; P, pedestal;  $C_a$ , carriage of lathe; B, bed of lathe;  $\theta$ , inclination angle;  $D_v$ , direction of vibration.

力測定用八角応力リング ( $T_f$ ) の上に取付けられており、さらに八角応力リングは旋盤の自動送り装置付き往復台 ( $C_a$ ) 上の切込量設定ゲージ付き保持台 (P) に取付けられている。

被削材は  $40 \times 40 \times 4$  mm のブナ (*Fagus crenata* Blume) の気乾材で、平均気乾比重0.65, 平均含水率9%, 平均年輪巾 1.3 mm であった。切削方向と被削材原表面のなす角  $\theta$  は  $0.35^\circ$  で一定にし、切削巾 4 mm で板目縦方向の順目切削を行った。また繊維方向と切削方向のなす角は  $0^\circ$  とした。

工具はすくい角  $35^\circ$ , 逃げ角  $5^\circ$  の炭素工具鋼 (SK4) であった。刃先の研磨は #400 のハンドラップで行い、その丸味半径が先端丸味半径  $2 \mu\text{m}$  の標準サンプルと比較してそれ以下になるようにした。工具の振動数  $f$  は 17.6 kHz, 振幅  $a$  は 0, 7 そして  $14 \mu\text{m}$ , 切削速度  $V$  は 0.69 mm/s とした。また振動方向と切削方向は平行とした。

勾配切削によって微小切込段階における実験を精度良く行うためには、被削材原表面の平滑さが要求される。そこで、原表面は切削速度 0.69 mm/s, 振幅  $10 \mu\text{m}$  の振動切削で仕上げた。この場合、一度勾配切削に供した被削材を水平にセットし直し、切削長さ 4 cm, 切込量  $50 \mu\text{m}$  で数回の平削りを行い (手動送りの無振動切削を繰り返し、最後の1回は自動送りの振動切削, 切削距離にして 0.2 m または 0.28 m), 再度被削材原表面を傾斜させて、振幅 0, 7 そして  $14 \mu\text{m}$  の順で勾配切削実験を繰り返し行った。さらに、勾配切削と比較するために平削りの実験を行った。

## 2.2 切削力の測定

切削力は八角応力リング (Fig. 2) に貼付した抵抗線歪ゲージによって背分力と主分力に分解し、動歪測定器を介して、直視式電磁オシログラフで記録した。八角応力リング (真鍮製) は著者らが試作したもので、計算<sup>2)</sup>より求めた固有振動数は約 724 Hz であった。

較正曲線を求めるために、八角応力リングに取付けた被削材に背分力および主分力方向の静的

生、切屑厚さの漸増、いわゆる微小切込段階における切削過程を検討し、その特徴を切込量と切削力の関係および切削力変動波形から明らかにした。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置および条件

Fig. 1 は実験装置の模式図である。工具—振動子系は金属旋盤のベット (B) に固定されている。勾配切削を行うために、被削材 (W) は傾斜角が調節できる傾斜台 (I) に取付けられている。この傾斜台は抵抗線歪ゲージを貼付した切削

荷重を掛け（二分力の作用方向より決定される平面内で荷重点を変化させて）、オシログラフペーパー上の変位と荷重の関係を調べた結果、荷重点の相違によって両者の関係は変化しないことが明らかになった。すなわち、各分力ごとに一種類の較正曲線で切削力が求められる。同様の結果は Yang<sup>2)</sup> によって示されている。

ところで、応力リングの加工精度、歪ゲージの貼付精度等によって、一般に各分力の相互干渉が生じる。本実験においては背分力の主分力への干渉は生じなかったが、主分力の約 9% が背分力に干渉した。そこで、真の背分力はこの干渉分を除去して求めた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 切屑発生点の切込量および臨界切込量の判定

Fig. 3 は勾配切削における切込量と切削力の関係を実験結果に基づき、模式的に示したものである。被削材原表面は切削方向（理想切削面）に対して  $\theta$  だけ傾斜している。切刃と被削材が接触しないようにセットし、被削材に送りを与えてやると、しばらくして両者は  $O$  点で接触し、以後設定切込量（以下切込量と呼ぶ）は直線的に増大するが、切刃は被削材表面を擦るだけで切屑はまだ発生せず、ある

程度切込量が大きくなる  $P$  点で初めて発生する。この点の切込量を  $t_p$  とし、切屑発生点の切込量と呼ぶことにする。いったん切屑が発生すると、以後連続して生じる。

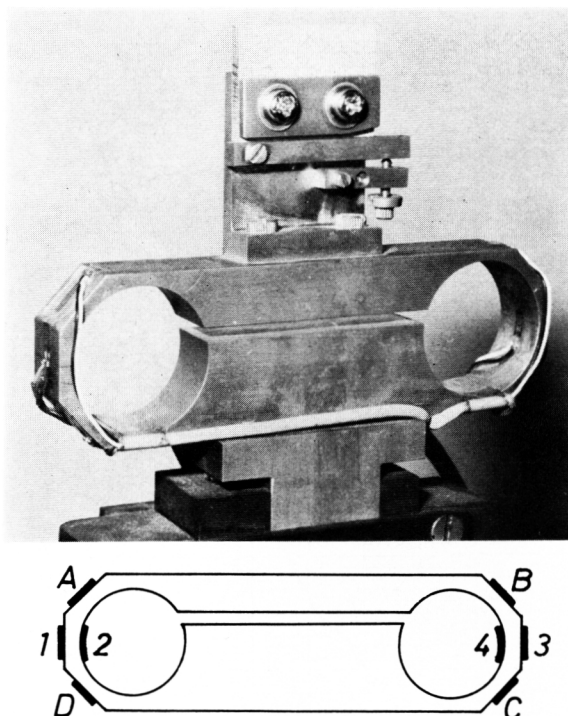


Fig. 2 Tool force dynamometer (elongated octagonal ring). 1, 2, 3 and 4 — strain gauges for vertical tool force; A, B, C and D — strain gauges for horizontal tool force.

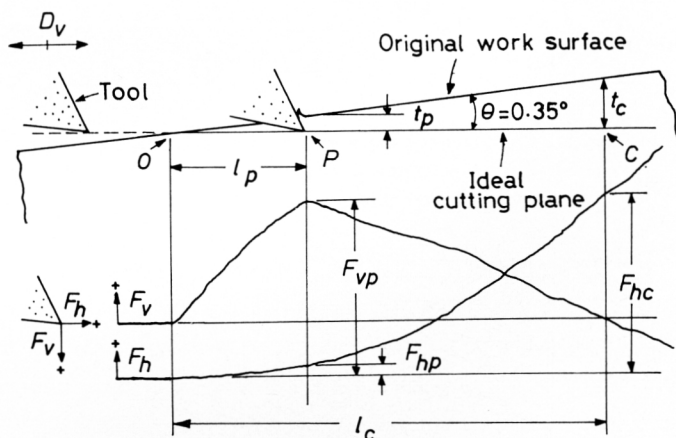


Fig. 3 Relation between nominal depth of cut and tool forces in inclined cutting.  $O$ , point of cutting edge-work material contact;  $P$ , chip initiation point;  $t_p$ , depth of cut at the chip initiation point;  $t_c$ , critical depth of cut;  $l_p$ , contact length;  $F_v$ , vertical tool force;  $F_h$ , horizontal tool force.

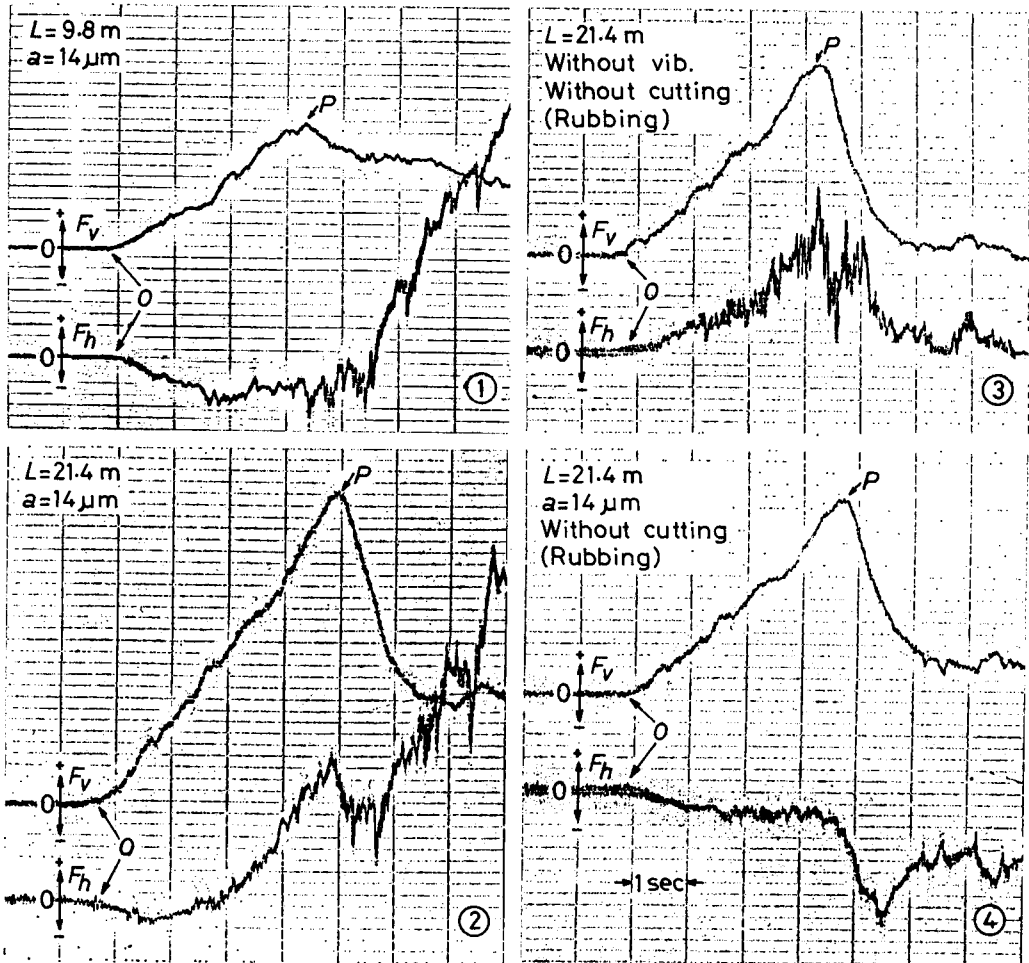


Fig. 4 Characteristic tool force patterns obtained.

$L$ , cutting length;  $a$ , amplitude of vibration; frequency  $f=17.6$  kHz (constant); cutting speed  $V=0.69$  mm/s (constant);  $\theta=0.35^\circ$ .

このような切削過程に対応して、背分力  $F_v$  は  $O$  点で立ち上がり始め、 $P$  点で最大となることが読取顕微鏡による切削過程の観察で確認された。 $P$  点で最大値を示した背分力は以後漸減し、ある程度切込量が大きくなると 0 となり、それ以上の切込量では負となる。背分力が 0 となる  $C$  点の切込量を  $l_c$  とし、臨界切込量と呼ぶことにする。一方、主分力  $F_h$  は一般に切込量の増大とともに増加する。

背分力が立ち上がりそして最大になるまでの時間はオシログラフのタイムスケールから求まる。切削速度は既知であるので、切刃が被削材に接触してから切屑が発生するまでの接触長さ  $l_p$  は簡単に求まる。さらに、切屑発生点の切込量  $l_p$  は  $l_p \cdot \tan \theta$  で求まる。同様にして臨界切込量  $l_c$  は  $l_c \cdot \tan \theta$  で求まる。

### 3.2 切削力の変化過程の特徴

微小切込段階における興味ある切削力波形を Fig. 4 に示す。工具は研磨後そのまま連続使用した。①、②に示すように、微小切込段階における振動切削では主分力  $F_h$  が負になる特徴的現

象が認められる場合がある。切刃と被削材が  $O$  点で接触すると主分力は減少し始め、負になり、ある程度切込量が大きくなると増加に転じ、やがて正の値になる。この傾向は無振動切削では全く認められない。一方、背分力  $F_x$  は  $O$  点から  $P$  点までは漸増し、 $P$  点からは減少する。ところで、切削を行わないで、切刃を振動させながら勾配切削で生成された切削面上を切削方向に擦らせると、④に示すように主分力はさらに負の増加傾向を強める。一方、同じ操作を無振動で行うと、③に示すように主分力は負にならないで背分力と同様の変化を示す。 $P$  点までは無振動切削における主分力の変化と全く一致する。

微小切込段階において、主分力が負になるこのような特徴的現象は次のように説明されるであろう。工具の最大振動速度  $2\pi af$  に対する切削速度  $V$  の比を  $\alpha_v$  で表わすと、

$$\alpha_v = \frac{V}{2\pi af}$$

となり、本実験の条件より  $\alpha_v = (4.5 \sim 8.9) \times 10^{-4}$  となる。すなわち、切削速度は工具の最大振動速度に比較してはるかに小さい。したがって、振動切削機構の解析<sup>3)4)</sup>から明らかなように、工具は被削材の表面上で前進・後退を繰返しながら断続切削を行っている。この切削機構に基づいて微小切込段階における切削力の作用のし方を検討してみると、工具が後退する時、逃げ面に作用する力の主分力方向成分は、被削材表面の弾性回復による逃げ面摩擦の影響をうけて、負の値になると考えられる。一方、工具が前進する時、切屑が発生する以前の微小切込段階においては、すくい面には切削力が作用しないが、切刃の不可避的先端丸味の影響をうけて刃先に作用する力と被削材表面の弾性回復による逃げ面摩擦の影響をうけて逃げ面に作用する力が生じ、これらの力の主分力方向成分の和は正の値になると考えられる。ところで、その絶対値は工具が後退する場合の負の値のそれに比較してかなり小さいものと推定される。かくして、工具の後退、前進の繰返しによって主分力の作用方向は負、正と変動することになる。しかし、その変動は 17.6 kHz と非常に速く、応力リングやオッシログラフの応答周波数では追従できないので、主分力は周期的に変動する力の総合となり、結局負の値になる。Fig. 4—④に示したように、切削を行わないで振動切刃を擦らせると主分力の負の増加傾向が強調されるのは、工具が前進する時には主分力方向成分はほとんど生じないで、工具が後退する時の主分力方向成分のみが支配的に作用するためであろう。ところで、切屑が発生し始めるとすくい面にも若干の切削力が作用するようになり、その主分力方向成分は正の値となり、切込量が増大するにつれて大きくなり、やがて主分力が正の値を示すようになる。

### 3.3 切削面の形状

Fig. 5 は Fig. 4—④の勾配切削によって得られた切削面の形状を、うねり成分のみを取出して、表面粗さ計で記録したものである。 $O$  点で切刃が被削材原表面に接触し、 $P$  点で切屑が発生するものと考えられる。いま、うねり曲線の縦および横倍率を考慮して、 $\theta = 0.35^\circ$  に相当する勾配を求めてみると、図上で  $17^\circ$  となる。したがって、被削材原表面を基準にして  $O$  点から  $17^\circ$  の直線を引くと、この直線が理想切削面を示すことになる。切屑が発生するまでは実際の切削面の方が、切刃で擦られた被削材表面の弾性回復のため、理想切削面より上方にあるが、切屑が発生し始めると理想切削面から大きく外れ、切刃が被削材の中へしっかり切込んでいく様子がわかる。

切削面に沿って測定した  $O-P$  間の距離は 2.2 mm となり、この値は Fig. 4—④から求まる接触長さ  $l_p$  の値 2.4 mm とほぼ一致する。また Fig. 5 から求まる切屑発生点の切込量  $t_{pa}$  は約 10  $\mu\text{m}$  で、この値は Fig. 4—④から求まる切込量  $t_p$  の値 15  $\mu\text{m}$  より 5  $\mu\text{m}$  ほど小さく、この差が切屑発生点における被削材表面の弾性回復量にほぼ相当するものと推察される。

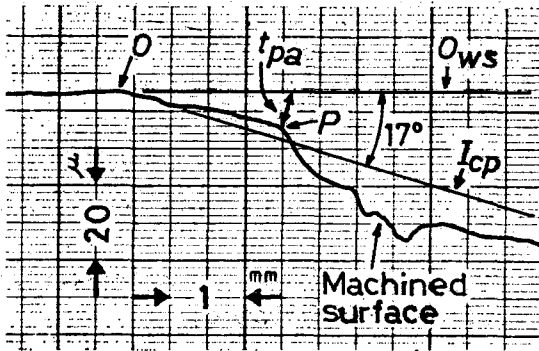


Fig. 5 Undulation of machined surface obtained after 9.8 m cutting (relating to Fig. 4-①).  $O_{ws}$ , original work surface;  $I_{cp}$ , ideal cutting plane.

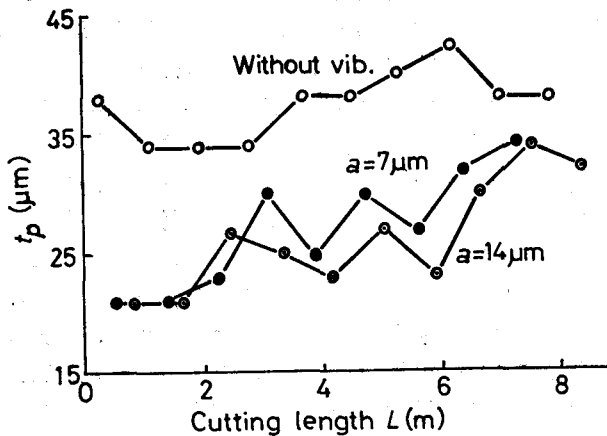


Fig. 6 Relation between depth of cut  $t_p$  at the chip initiation point and cutting length.

を示すが、振動切削における  $F_{hp}$  は  $F_{vp}$  よりも小さく、さらに無振動切削の  $F_{hp}$  に比較して極端に小さく、場合によっては Fig. 4 のように負の値を示す。このため被削材への切刃の切込み抵抗は非常に小さく、したがって切刃の切込みは容易になる。木材の超音波振動切削における切込促進効果は主成分力のこのような特性と密接に関係しているものと考えられる。

### 3.5 臨界切込量および主成分力

Fig. 8 に臨界切込量  $t_c$  と切削距離  $L$  の関係を示す。 $t_c$  は  $L$  の増加とともに増大の傾向を示す。振動切削では無振動切削に比較して  $t_c$  の値は小さく、特に振幅  $7 \mu\text{m}$  の場合は顕著に小さい。振幅  $14 \mu\text{m}$  における  $t_c$  は  $7 \mu\text{m}$  の  $t_c$  より大きく、明らかに Fig. 6 の  $t_p$  とは様相を異にしている。いずれにせよ振動切削ではより小さい切込量で背成分力が負に変わる。このことは振動切削では切刃を被削材の中へ引込もうとする力が強く作用していることを示しており、切込促進効果の存在を裏付けている。

ところで Fig. 9 に示すように、臨界切込量における主成分力  $F_{hc}$  は Fig. 7 の  $F_{hp}$  と同様の傾向を示すが、切込量が違うので当然その値は異なる。

### 3.6 平削りと勾配切削の比較

このように、切削面のうねり曲線から微小切込段階における切削過程の特徴をある程度明らかにすることができる。

### 3.4 切屑発生点の切込量および切削力

以下の実験では工具を再研磨し、以後連続使用した。

Fig. 6 に示すように、すべての条件において切屑発生点の切込量  $t_p$  は切削距離  $L$  の増加とともに増大する。これは切刃の摩耗が進行することによって切屑の発生が遅れるためであらう。

振動切削では無振動切削よりも  $t_p$  の値は小さく、さらに振幅が大きいほど小さく、明らかに切込促進効果が認められる。同様の結果は前報<sup>1)</sup>でも報告した。

Fig. 7 は切屑発生点  $t_p$  における背成分力  $F_{vp}$  および主成分力  $F_{hp}$  と切削距離  $L$  の関係を示している。 $F_{vp}$  に関しては  $t_p$  の場合と全く同様の傾向が認められる。 $F_{hp}$  は  $L$  の増加に関係なくほぼ一定の値である。無振動切削において  $F_{hp}$  は  $F_{vp}$  に匹敵する大きさ

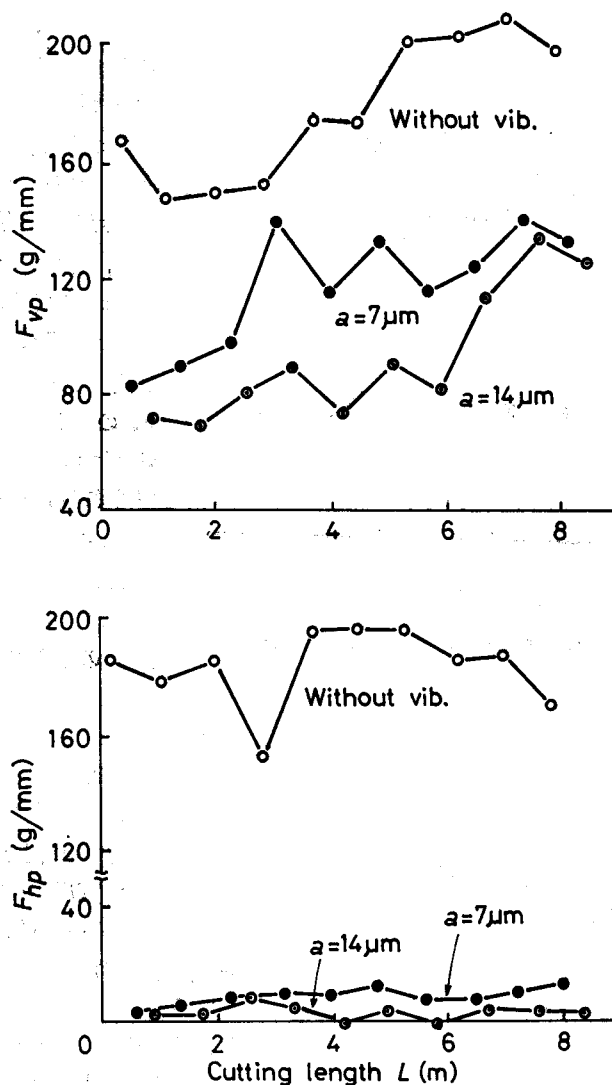


Fig. 7 Relation between vertical tool force  $F_{vp}$  and horizontal tool force  $F_{hp}$  at the depth of cut  $t_h$  and cutting length.

前節までは勾配切削について考察してきたが、これと比較検討を行うために、より一般的な平削りの実験を行った。この実験では工具を再研磨しないで使用し、総切削距離にして約 0.7 m で実験を完了した。したがって、工具の摩耗は先の実験 (Fig. 6 ~ Fig. 9) で 8.40 m 切削した時点でのそれと大差がないと仮定して以下の検討を行う。

Fig. 10 の実験直線是最小二乗法で求めたもので、切込量  $50\mu m$  以下の範囲についても線形性を仮定している。背分力  $F_v$  が 0 となる切込量すなわち臨界切込量を求めてみると、無振動切削では  $190\mu m$ 、振幅  $14\mu m$  の振動切削では  $145\mu m$  そして振幅  $7\mu m$  である。これらの切込量の値は Fig. 8 に示した勾配切削における臨界切込量  $t_c$  の値とはほぼ一致している。さらに、平削りにおける臨界切込量 (矢印) に対応する主分力  $F_h$  の値は無振動切削では  $950\text{ g/mm}$ 、振幅  $14\mu m$  の振動切削では  $170\text{ g/mm}$ 、そして振幅  $7\mu m$  では  $220\text{ g/mm}$  である。これらの主分力



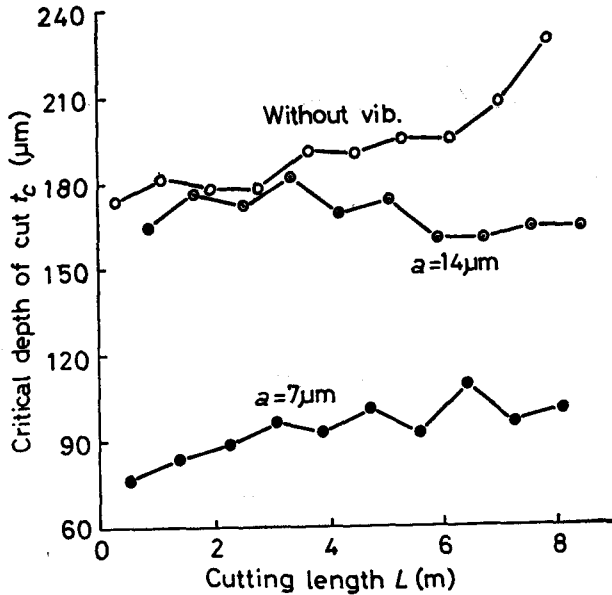


Fig. 8 Relation between critical depth of cut and cutting length.

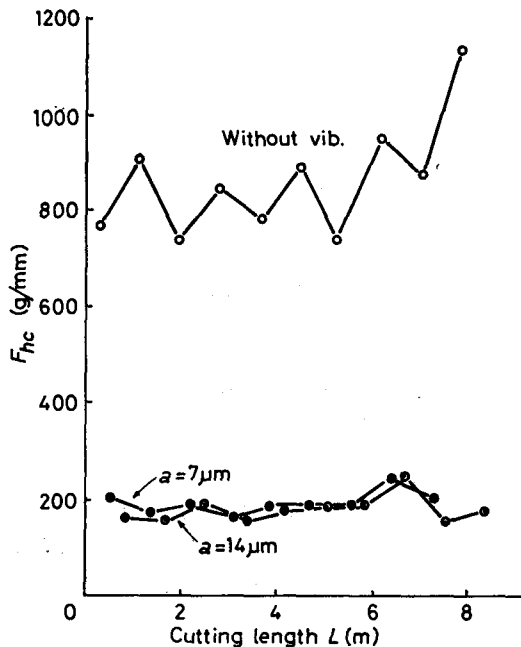


Fig. 9 Relation between horizontal tool force  $F_{hc}$  at the critical depth of cut  $t_c$  and cutting length.

の値は Fig. 9 に示した勾配切削における主分力  $F_{hc}$  のそれぞれの値とはほぼ一致している。

ところで、Fig. 6 において 7～8 m 切削した時点における切屑発生点の切込量  $t_p$  の値を無振動切削では 40  $\mu\text{m}$ 、振幅 7 および 14  $\mu\text{m}$  の振動切削では 30  $\mu\text{m}$  とすると、Fig. 10 よりこれらの切込量（三角印）に対応する背分力  $F_o$  の値はそれぞれ 150 g/mm、40 g/mm そして 70 g/mm と推定される。これらの値は Fig. 7 において 7～8 m 切削した時点の背分力  $F_{o,p}$  の値よりかなり小さいが、この理由は明確でない。同様の検討を主分力について行うと、無振動切削における  $t_p$  の

値 40  $\mu\text{m}$  に対応する平削りの主分力  $F_h$  と勾配切削の主分力  $F_{hp}$  とは異なっているが、振動切削における  $t_p$  の値 30  $\mu\text{m}$  に対応する平削りの主分力  $F_h$  の値は 30 g/mm 以下であり、勾配切削における主分力  $F_{hp}$  の値（10 g/mm 以下）と同様かなり小さい。これらのことを考慮すると、平削りにおいて切屑が発生するために必要な最小限の切込量は 20～30  $\mu\text{m}$  と推定され、勾配切削におけるそれとはほぼ一致するものと考えられる。

以上のように、平削りと勾配切削とはかなり良く対応する点のあることが判明した。さらに注目されることは、Fig. 10 に示すように切込量が 20  $\mu\text{m}$  以下になると平削りの振動切削でも主分力が負になる可能性がある。これは Fig. 4 に示したように、勾配切削の微小切込段階において主分力が負になる傾向と良く一致している。

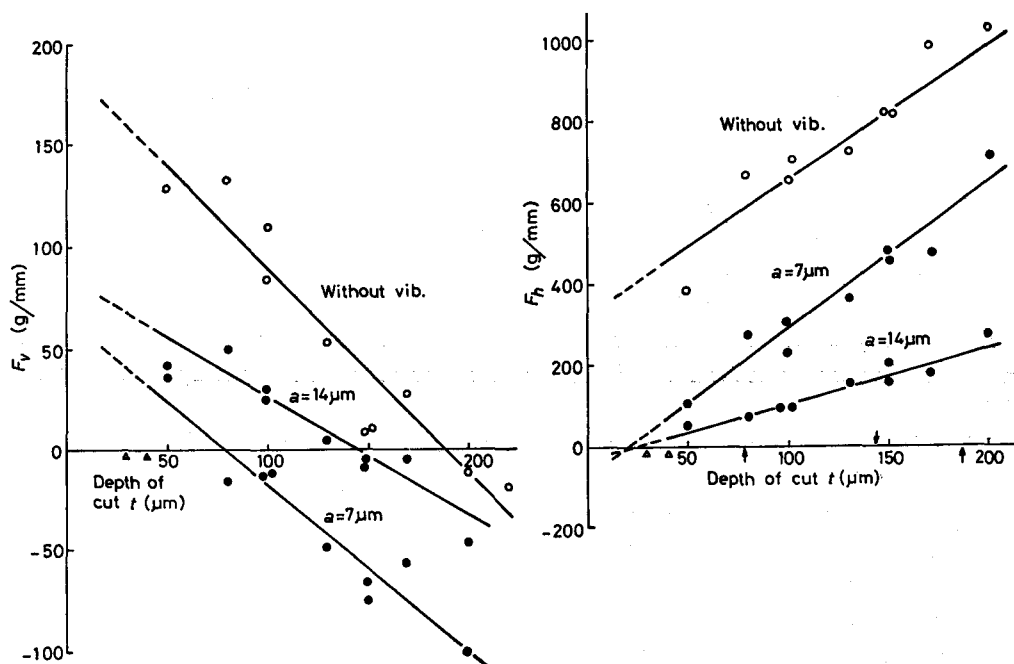


Fig. 10 Relation between vertical tool force  $F_v$  and horizontal tool force  $F_h$  and depth of cut in orthogonal cutting ( $\theta=0^\circ$ ). The arrows indicate the critical depth of cut obtained from the left figure, and the triangular marks indicate the value of  $t_p$  obtained from Fig. 7 for the final cutting length (the region of 7 m~8 m).

## 引用文献

- 1) Fujiwara, K., Okumura, H. and Sugihara, H.: Incision Effect in Ultrasonic Vibratory Cutting of Wood, Bulletin of the Kyoto University Forests, No. 49, Oct., 145-151 (1977)
- 2) Yang, C.T.: Design of Surface Grinding Dynamometers, Transactions of the ASME (B), Feb., 127-133 (1968)
- 3) Fujiwara, K., Noguchi, M. und Sugihara, H.: Die kritische Schnittgeschwindigkeit beim Vibrationsschneiden von Holz mit Ultraschallfrequenz, Holztechnologie, 15 (3), 149-157 (1974)
- 4) Fujiwara, K.: Fundamental Analysis of the Ultrasonic Turning Process of Wood, Doctoral Thesis, Kyoto University, (1976)

## Résumé

In order to examine the incision effect (promotion effect of the penetration of cutting edge into work material) in the ultrasonic vibratory cutting of wood, relation between depth of cut and tool forces, and characteristic tool of force patterns, etc. in the region of infinitesimal depth of cut were clarified using an inclined cutting method in which original work surface was inclined by a given angle toward the cutting direction and the depth of cut increased linearly during cutting. The results obtained are summarized as follows;

- 1) The vertical tool force in the inclined cutting rises at the point of cutting edge-work material contact and increases with increasing depth of cut, and before long takes

a certain maximum at chip initiation point (at this point the cutting edge penetrates first into work material and the chip moves up the tool face), and then the vertical tool force decreases with increasing depth of cut and finally becomes negative. On the other hand, the horizontal tool force in general increases monotonously with increasing depth of cut.

2) The depth of cut  $t_p$  at the chip initiation point in the vibratory cutting is smaller than that in the conventional cutting (cutting without vibration), and the greater the amplitude of vibration becomes, the smaller  $t_p$  becomes, so that there is the incision effect undoubtedly. Furthermore,  $t_p$  becomes greater with increasing cutting length  $L$ . The same tendency is recognized concerning the vertical and horizontal tool forces with the exception that the horizontal tool force is almost constant independently of the increase of  $L$ .

3) In the conventional cutting the magnitude of horizontal tool force at the chip initiation point is comparable to that of vertical tool force. However, in the vibratory cutting the characteristic phenomenon is recognized that at this point the horizontal tool force is smaller than the vertical tool force and is an extremely small positive value or is equal to zero and, in certain circumstance, takes a small negative value. In the vibratory cutting with constant depth of cut, there is the possibility that the horizontal tool force also takes a negative value in the region of infinitesimal depth of cut. The appearance of incision effect in the vibratory cutting of wood is due probably to this characteristic phenomenon.

4) Based on the analysis of the undulation pattern of machined surface, characteristic of cutting process in the region of infinitesimal depth of cut in the inclined cutting can be clarified to some extent.

5) It is assumed that the minimum depth of cut essential for chip formation in the inclined cutting coincides almost with that in the orthogonal cutting with constant depth of cut. The critical depth of cut (in this case the vertical tool force is equal to zero) and the horizontal tool force at this depth of cut in the inclined cutting coincide almost with these in the orthogonal cutting.